

Evaluation des effets de surpression liés aux phénomènes d'explosion

Méthodologie

CONSULTING

SAFEGE
444, Avenue du Général Leclerc

77190 DAMMARIÉ LES LYS

Agence Ile de France

Date : Janvier 2017

Nom Prénom : SG

Méthodologie

Evaluation des effets de surpression liés aux phénomènes d'explosion

Sommaire

1.....	Qu'est-ce qu'une explosion ?	3
2.....	UVCE ou explosion confinée ?	5
3.....	Calcul de l'énergie d'explosion	6
3.1	Énergie de Brode	6
3.2	Énergie de combustion	8
4.....	Calcul des distances de surpression	9
4.1	Le modèle TNO Multi-énergie	9
4.2	Le modèle équivalent TNT	14
4.3	La méthode de Strehlow-Baker	17
5.....	Les effets d'une explosion	19
5.1	Ordres de grandeur pour les structures	19
5.2	Ordre de grandeur pour l'homme	21
5.3	Les seuils réglementaires – arrêté du 29/09/2005	21

Tables des illustrations

Figure 1 :	Courbes Multi-énergie donnant la surpression en fonction de la distance réduite	10
Figure 2 :	Grille de Kinsella	12
Figure 3 :	Arbre de décision : unité de process	13
Figure 4 :	Abaque TM5-1300 donnant la surpression en fonction de la distance réduite	15

1 QU'EST-CE QU'UNE EXPLOSION ?

Une explosion est une libération brutale d'énergie avec production d'effets mécaniques et éventuellement thermiques. Une explosion peut être de plusieurs natures :

1. Explosions physiques :

Elles sont liées à l'éclatement d'un contenant dont la pression intérieure est devenue trop élevée, par montée en pression d'une phase vapeur ou liquide surchauffée.

Lors de l'augmentation de la pression dans un contenant, les parois les plus fragiles se rompent lorsque la contrainte est trop importante. La rupture du contenant permet la libération de la pression contenue qui se traduit par la propagation d'une onde de pression aérienne.

2. Explosions thermiques :

On parle d'explosion thermique lorsqu'il y a une combustion interne au système. C'est notamment le cas de l'inflammation d'un mélange de vapeurs.

Les conditions à réunir pour qu'une combustion ait lieu sont présentées par l'hexagone de l'explosion ci-dessous :



La propagation du front de flamme à travers le mélange combustible agit comme un piston sur l'air environnant et entraîne mécaniquement la formation d'ondes de surpressions. Ces surpressions dépendent donc de la vitesse de propagation du front de flamme.

De nombreux paramètres, dont notamment la turbulence du mélange explosif, ont une influence considérable sur la vitesse de propagation du front de flamme. En effet, la turbulence favorise une meilleure efficacité de la combustion et par conséquent une vitesse de propagation du front de flamme plus importante. De fait, l'effet piston est renforcé, et en conséquence, plus de turbulence est induite dans le mélange en amont du front de flamme. Cette rétroaction positive est à la source des ondes de surpressions destructrices parfois observées.

3. Explosions chimiques :

Une explosion chimique est une explosion liée à un emballement thermique. L'emballement thermique correspond à la perte de contrôle de température d'un milieu réactionnel, due à une réaction exothermique.

L'emballement thermique peut conduire à l'explosion, qui est caractérisée par une libération brutale d'une quantité importante d'énergie, souvent accompagnée de fortes émissions de gaz et/ou vapeur qui peuvent être inflammables et/ou toxiques.

Dans le cas d'une explosion physique, l'explosion est forcément confinée.

En revanche, dans le cas d'une explosion thermique, l'explosion peut être confinée (éclatement d'un réservoir de liquide inflammable) ou non confinée (il s'agit alors de l'explosion non confinée d'un nuage de vapeur) appelée également UVCE (Unconfined Vapor Cloud Explosion).

On s'attachera à donner, pour chaque situation rencontrée, les méthodes de calcul des distances de surpression → **Voir le schéma présenté page 5 du présent rapport.**

Notons toutefois que les différentes méthodes se basent sur le même principe :

- 1- **Calcul de l'énergie de l'explosion**
- 2- **Calcul des distances d'effets de surpression**

2 UVCE OU EXPLOSION CONFINÉE ?

UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion) :

L'UVCE est une explosion de gaz à l'air libre. Le phénomène d'explosion suppose la présence d'un mélange inflammable (dans les limites d'explosivité) et d'une source d'ignition à proximité du point de fuite ou du nuage.

Après inflammation du mélange inflammable, la combustion, appelée aussi front de flamme, se propage dans le mélange inflammable non brûlé. Ce front de flamme, associé à l'expansion volumique des gaz brûlés (boule de feu), agit à la manière d'un piston sur les gaz frais environnant et peut être à l'origine de la formation d'une onde de pression aérienne, appelée déflagration, si sa vitesse de propagation est suffisante.

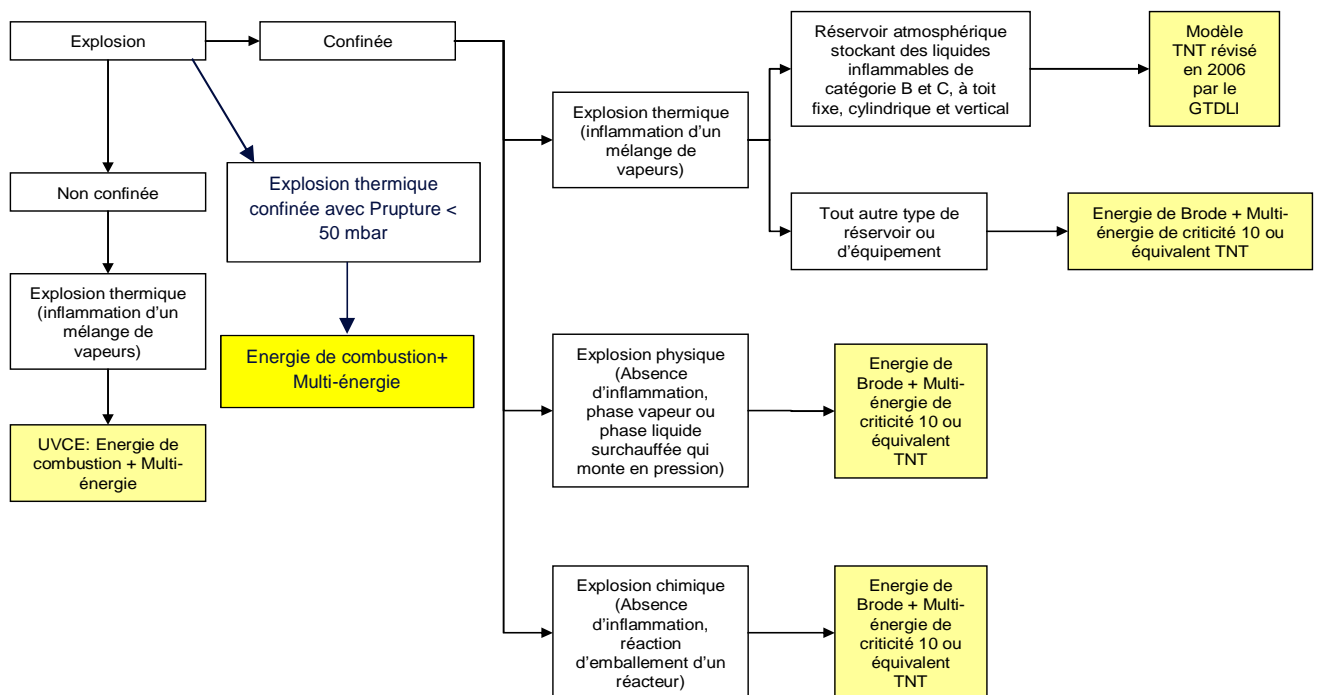
Le terme UVCE s'applique lorsque des effets de pression sont observés. En l'absence d'effets de pression le terme Flash-fire est utilisé.

Dans les deux cas il s'agit du même phénomène physique, à savoir la combustion d'un mélange gazeux inflammable.

Explosion confinée :

L'explosion confinée est un éclatement pneumatique d'une capacité ou d'une enceinte suite à une montée en pression interne. Le relâchement brutal lié à la rupture de l'enceinte ou du contenant engendre une onde de pression aérienne et peut générer des effets de projection (missiles). L'énergie disponible pour l'explosion dépend du type de rupture → **voir les pressions de ruptures chapitre 3.1.1.**

Le schéma ci-dessous aide à la prise de décision concernant la modélisation la plus adaptée à chaque cas :



3 CALCUL DE L'ÉNERGIE D'EXPLOSION

Deux méthodes principales permettent de calculer l'énergie de l'explosion :

1. **L'énergie de Brode ;**
2. **L'énergie de combustion.**

3.1 Énergie de Brode

L'énergie de Brode traduit l'augmentation de l'énergie interne d'un réservoir ou d'un équipement produite par l'accroissement de la pression. Cet accroissement peut être dû à une augmentation de la température des gaz (dans le cas d'une explosion thermique ou d'une explosion chimique) ou à l'injection de gaz supplémentaire (dans le cas d'une explosion physique).

Lorsque la pression de rupture d'une enceinte est connue, le calcul de l'énergie de pression résiduelle après rupture de l'enceinte peut être réalisé avec l'équation dite de Brode (Proust, 1991). Cette énergie est l'énergie pouvant participer à la production de missiles, d'ondes de surpression ou de flux thermiques.

Selon le premier principe de thermodynamique, l'énergie véhiculée dans l'onde de surpression répond à la formule suivante :

$$E_{Brode} = \frac{(P_1 - P_0) \cdot V_1}{\gamma_1 - 1}$$

Avec :

P1 = Pression absolue dans la capacité au moment de sa rupture (Pa)

P0 = Pression atmosphérique (Pa)

V1 = Volume du ciel gazeux (m³)

γ_1 = Rapport des chaleurs spécifiques du gaz (1,4 pour les gaz diatomiques, 1,66 pour les gaz monoatomiques et 1,33 pour la vapeur d'eau)

Lorsque la pression de rupture n'est pas connue avec précision ou par sécurité on peut de manière majorante prendre en compte une pression de rupture égale à trois fois la pression de service de l'enceinte (INERIS – Rapport $\Omega 15$ Éclatement de réservoir).

Sinon, la pression de rupture peut-être retenue suivant les cas présentés dans le tableau suivant :

Type de capacité	Origine de l'éclatement	Type de rupture	Δp (Pression de rupture absolue - pression ambiante)	Source
Capacité sous pression, réacteur, capacité atmosphérique	Sur-remplissage augmentation de pression	--	Prupture statique	Ω 15 Ineris 2013
	Capacité prise dans un feu augmentation de pression	--	< Prupture à température ambiantes	Ω 15 Ineris 2013
		Système avec soupape	1,21x Pression de tarage des soupapes	Yellow Book (7.29)
	1,1 x Pression de tarage des soupapes		Guide bleu UFIP – juil 02 (p.385)	
	Explosion interne de la phase gazeuse	--	2 x Prupture statique	Ω 15 Ineris 2013
	Emballement de réaction	--	6,5 x Pservice	Guide bleu UFIP – juil 02 (p.385)
		--	7,5 x Pservice	Guide bleu UFIP – juil 02 (p.385)
		Système avec soupape	2,5 x Pdesign	Yellow Book (7.29)
	Incidence de fatigue corrosion affaiblissement mécanique	--	Prupture statique	Ω 15 Ineris 2013
			Pression de stockage ou de service	Yellow Book (7.29)
Pservice relative			Guide bleu UFIP – juil 02 (p.385)	
Impact projectile	--	Pservice relative	Ω 15 Ineris 2013	
Bac atmosphérique de liquide inflammable	Explosion interne de la phase gazeuse	Frangible	10 x Pvaleur de la rupture de la liaison frangible	Guide bleu UFIP – juil 02 (p.385)
	Explosion interne de la phase gazeuse	Non frangible	1,5 x Pservice	Guide bleu UFIP – juil 02 (p.385)
			Modèle TNT révisé du GTDLI pour les bacs atmosphériques voir chapitre 4.2.2	
Pressurisation lente liée à une lente montée en pression liée à un incendie externe	--	Note de diffusion BRTICP/2008-638/OA du 23/12/08 relative à la modélisation des effets liés au phénomène de pressurisation de bac atmosphérique à toit fixe → www.ineris.fr/aida . Document ancien abrogé par la circulaire du 10 mai 2010, mais toujours utilisé au titre de méthode reconnue par le ministère.		
Silo	Explosion interne de poussières	Système non événementé	2 x Prupture statique	Guide silo Ineris 2008
		Système événementé	Pred	Guide silo Ineris 2008

3.2 Énergie de combustion

L'énergie de combustion est l'énergie dégagée par la réaction de combustion d'un gaz par l'oxygène de l'air. Le calcul de cette énergie est uniquement valable dans le cas d'une explosion non confinée de type UVCE dont les étapes sont les suivantes :

1. **rejet dans l'atmosphère d'un gaz ou d'un liquide inflammable volatil, avec ou sans émission d'aérosols,**
2. **évaporation de la nappe de liquide formée, dans le cadre d'un rejet de liquide,**
3. **formation d'un nuage inflammable entre l'air et le gaz,**
4. **dispersion du nuage air-gaz compris entre la LIE et la LSE qui s'enflamme en présence d'une source d'ignition,**
5. **propagation du front de flamme dans le nuage inflammable provoquant une onde de pression aérienne.**

L'énergie de combustion est donnée par la formule suivante :

$$E = \Delta H \times m_{\text{explosible}}$$

$$E = \Delta H \times \rho_{\text{vol}} \times C_{\text{stoecho}} \times V_{\text{explosible}}$$

Avec :

E : énergie de combustion en kJ

ΔH : chaleur de combustion en kJ/kg

$m_{\text{explosible}}$: masse de produit mise en jeu dans l'explosion en kg

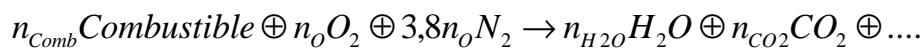
$V_{\text{explosible}}$: volume du nuage explosible en m³

ρ_{vol} : masse volumique du gaz (kg/m³)

C_{stoecho} : concentration stœchiométrique (en %)

Où l'on a :

$$C_{\text{stoecho}} = \frac{n_{\text{Comb}}}{n_{\text{Comb}} + 4,8n_{\text{O}}}$$



4 CALCUL DES DISTANCES DE SURPRESSION

Il existe plusieurs méthodes pour calculer les surpressions aériennes dues aux explosions. Les plus utilisées sont :

- le modèle **TNO Multi-energy**, pour des explosions **confinées** ou **non confinées (UVCE)**,
- l'**équivalent TNT**, pour des explosions **confinées** ;
- la **méthode de Strehlow-Baker**, pour des explosions thermiques exclusivement.

4.1 Le modèle TNO Multi-énergie

4.1.1 Principe du modèle Multi-énergie

Le principe de ce modèle, développé par Van den Berg au TNO, est d'accumuler la masse participante à l'explosion, évaporée dans un environnement plus ou moins encombré.

La méthode conduit, en quatre étapes, à évaluer le niveau de pression atteint en fonction du niveau de confinement ou d'obstruction du mélange inflammable.

1. Calcul du rayon caractéristique :

$$R_c = \left(\frac{E}{P_0} \right)^{1/3}$$

Avec :

E en Joules

P₀ pression atmosphérique en Pascal (101 325 Pa)

2. Choix du degré de sévérité :

Dans le cas d'une explosion non confinée, le choix du degré de sévérité peut se faire suivant la méthode de KINSELLA ou TNO présentées au chapitre 4.1.2. Dans le cas d'une explosion confinée, le degré de sévérité est fixé à 10.

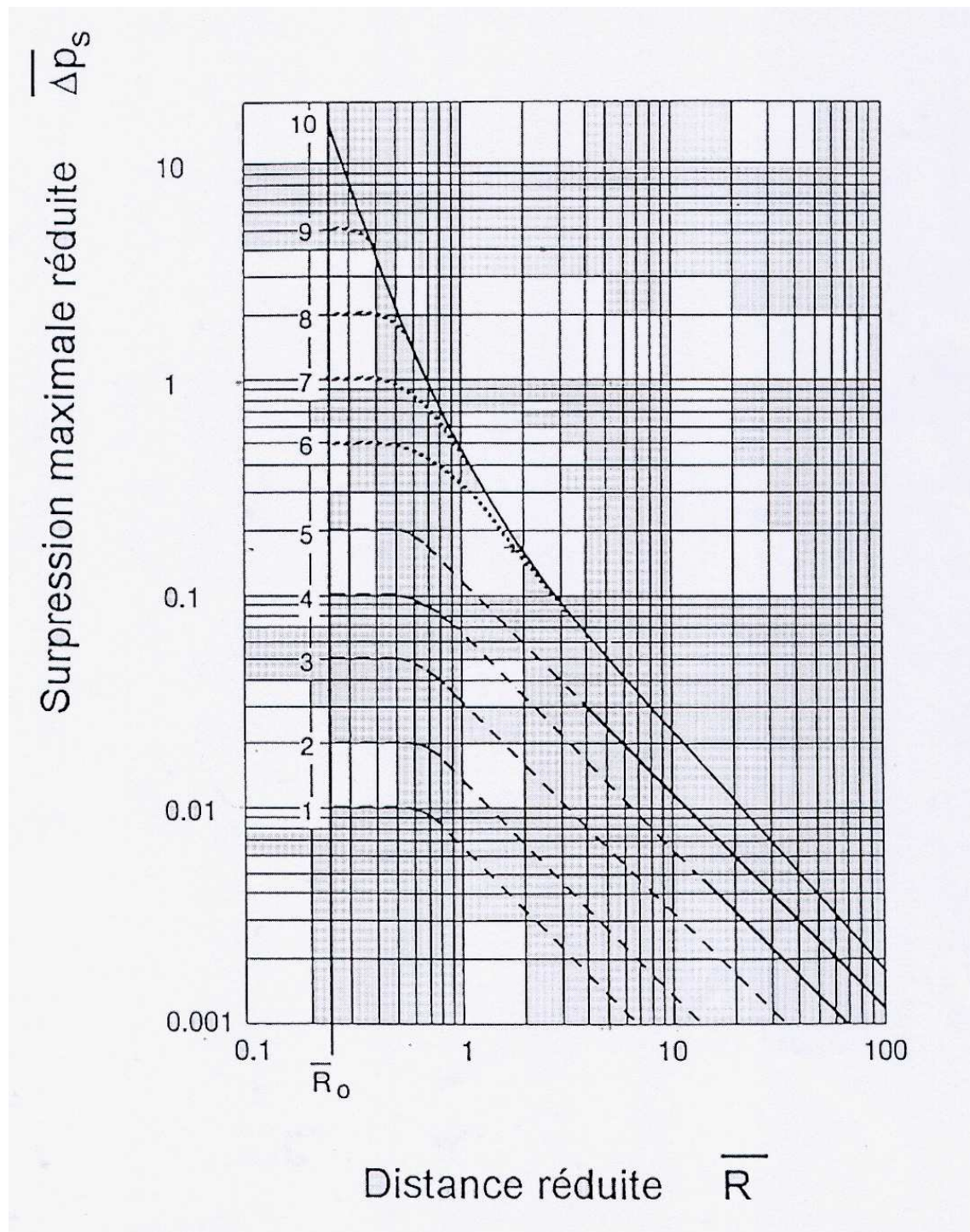
3. Détermination de la distance réduite :

Utilisation des courbes Multi-énergie ci-dessous pour déterminer \overline{R}

4. Détermination du rayon du cercle de dommage : $X = \overline{R} \times R_c$

X étant la distance en m entre le centre du nuage et le seuil de surpression défini en mètre.

Figure 1 : Courbes Multi-énergie donnant la surpression en fonction de la distance réduite



4.1.2 Choix du degré de sévérité

Le tableau ci-dessous rappelle la correspondance entre les surpressions maximales et les indices (compris entre 1 et 10).

Indice de la méthode (-)	Surpression maximale correspondante
	(mbar)
1	10
2	20
3	50
4	100
5	200
6	500
7	1 000
8	2 000
9	5 000
10	10 000

Le choix de l'indice est la phase la plus délicate de la méthode « Multi-Energie » puisqu'il n'existe pas aujourd'hui de méthode consensuelle. Les méthodes les plus couramment utilisées sont celles de KINSELLA (1993) et du TNO (1997).

4.1.2.1 Méthode de KINSELLA

Pour les explosions de gaz à l'air libre ou UVCE modélisées à travers un modèle multi-énergie, le choix du degré de sévérité peut se faire à travers la méthode de KINSELLA qui se présente sous la forme d'un tableau présenté ci-dessous. En fonction de 3 paramètres, le degré de sévérité peut être estimé :

- **Energie d'inflammation**
- **Degré d'encombrement**
- **Degré de confinement**

Figure 2 : Grille de Kinsella

Energie d'inflammation		Degré d'encombrement			Degré de confinement		Indice
Faible	Fort	Fort	Faible	Inexistant	Existant	Inexistant	
	*	*			*		7 à 10
	*	*				*	7 à 10
*		*			*		5 à 7
	*		*		*		5 à 7
	*		*			*	4 à 6
	*			*	*		4 à 6
*		*				*	4 à 5
	*			*		*	4 à 5
*			*		*		3 à 5
*			*			*	2 à 3
*				*	*		1 à 2
*				*		*	1

4.1.2.2 Méthode TNO

4.1.2.2.1 Approche simplifiée selon le guide de l'INERIS:

Source : INERIS Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre - Rapport de juillet 1999

10 : zone correspondant à des zones encombrées d'obstacles.

3-4 : pour les volumes ne correspondant pas à des zones encombrées et lorsque le nuage inflammable, susceptible d'envahir ces zones, est caractérisé par une agitation turbulente.

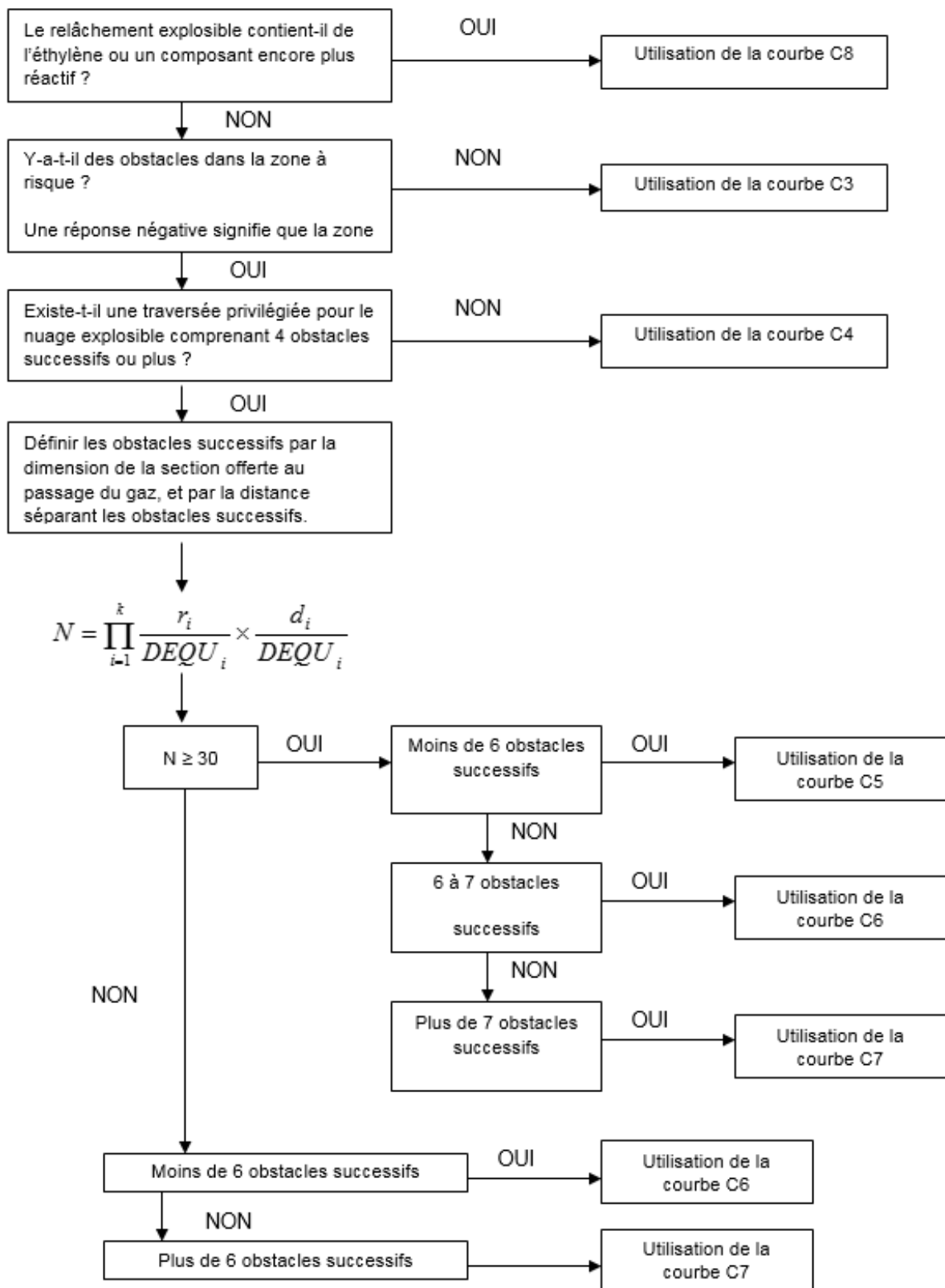
1 : pour les volumes ne correspondant pas à des zones encombrées et lorsque le nuage inflammable, susceptible d'envahir ces zones, est considéré au repos thermodynamique.

4.1.2.2.2 Approche complète selon le guide de l'UFIP.

Cette approche est basée sur l'arbre de décision présenté ci-après.

Source : UFIP Guide méthodologique pour la réalisation des études de dangers en raffineries, stockages et dépôts de produits liquides et liquéfiés – Volume II Modèles normalisés de quantification – Mai 2001

Figure 3 : Arbre de décision : unité de process



4.2 Le modèle équivalent TNT

4.2.1 Principe général

Le principe du modèle équivalent TNT est de rapporter l'énergie de l'explosion à une masse équivalente de TNT, pour laquelle on peut faire un lien entre la surpression engendrée par l'explosion et la distance au centre de l'explosion.

Le modèle conduit, en trois étapes, à évaluer le niveau de pression atteint en fonction du niveau de confinement ou d'obstruction du mélange inflammable.

1. Calcul de la masse d'équivalent TNT → m_{TNT}

$$m_{TNT} = E / E_{TNT}$$

Avec E_{TNT} l'énergie spécifique de combustion du TNT ($E_{TNT} = 4690$ kJ/kg)

2. Détermination de la distance réduite

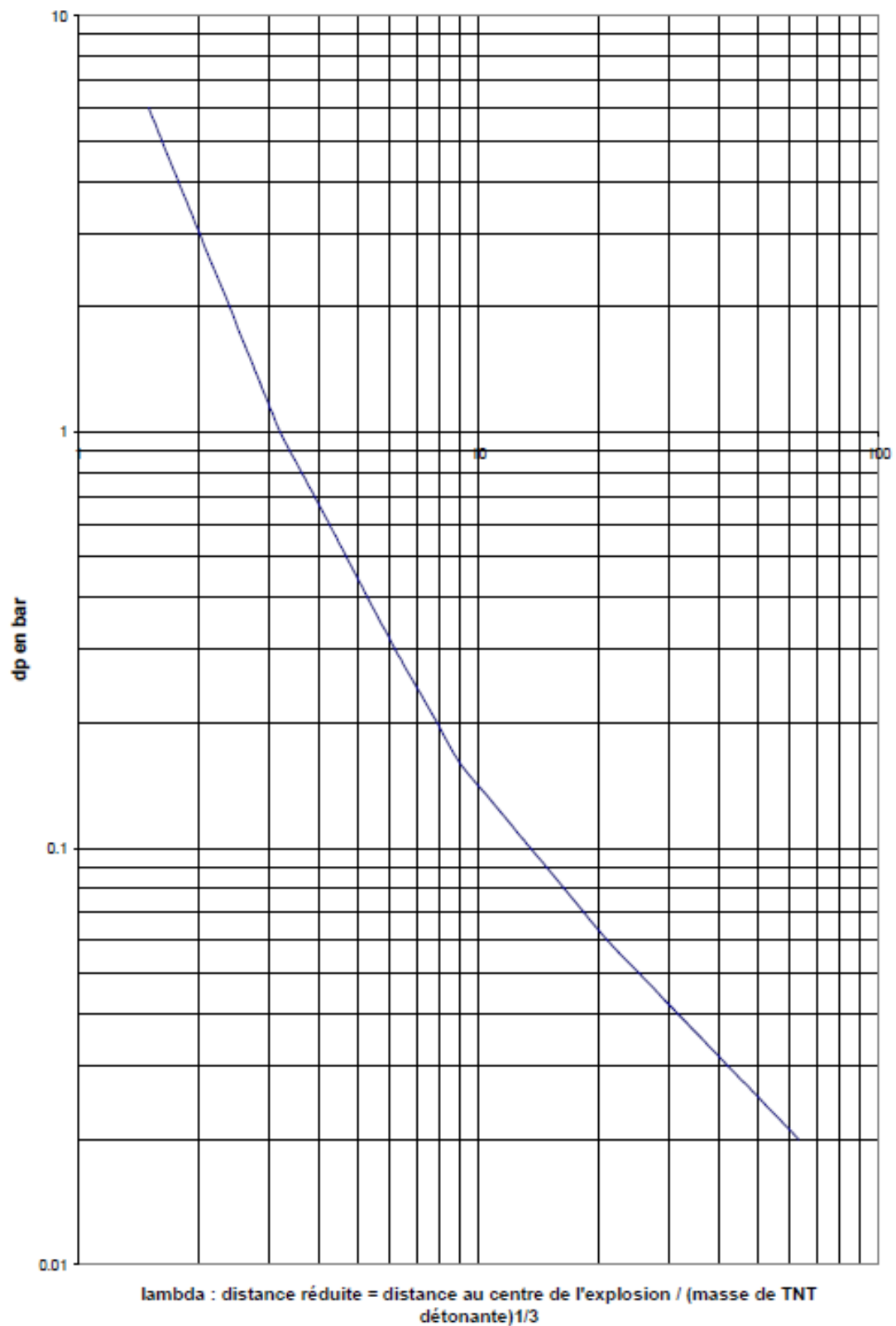
Utilisation des abaques TM5-1300 (voir ci-dessous) pour déterminer : \overline{R}

3. Détermination du rayon du cercle de dommage

$$X = \overline{R} \times m_{TNT}^{1/3}$$

X étant la distance en m entre le centre du contenant qui explose et le seuil de surpression défini en mètre.

Figure 4 : Abaque TM5-1300 donnant la surpression en fonction de la distance réduite



4.2.2 Modèle TNT révisé du GTDLI pour les bacs atmosphériques

Source: INERIS Modélisation des effets de surpression dus à une explosion de bac atmosphérique - Mai 2006

Le modèle TNT a été révisé en mai 2006 par le GTDLI, Groupe de Travail sur les Dépôts de Liquides Inflammables, pour les surpressions dues à une explosion de bac atmosphérique.

Cette méthode s'applique exclusivement à toutes les capacités atmosphériques :

- **stockant des liquides inflammables de catégorie B et C,**
- **cylindriques et verticales,**
- **à toit fixe.**

La nouvelle équation, présentée ci-dessous, tient compte de nouveaux paramètres tels que la pression d'éclatement du réservoir, la hauteur du réservoir...

$$d_i = \lambda_i \times 4,74.10^{-3} \times [PATM.DEQU^2.HEQU]$$

DEQU = Diamètre du bac (m)

HEQU = Hauteur du bac (m)

PATM = Pression atmosphérique (Pa)

λ_i = distance réduite fonction du seuil de surpression recherchée et obtenue par lecture des abaques TM5-1300 (voir la figure 3)

4.3 La méthode de Strehlow-Baker

Source : INERIS Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre - Rapport de juillet 1999

La méthode de Strehlow-Baker est uniquement applicable aux explosions thermiques.

Selon Baker, une estimation de la vitesse de propagation des flammes peut être obtenue en considérant :

- la réactivité du combustible mis en jeu
- la densité d'obstacles
- le degré de confinement

Réactivité du combustible	Types de combustibles
forte	Hydrogène, acétylène, les oxydes d'éthylène ou de propylène
Moyenne	les autres gaz combustibles
faible	méthane et monoxyde de carbone

Par ailleurs, en cas de mélange de combustibles, il est proposé de retenir la classe de réactivité du combustible le plus réactif dès lors que ce dernier représente au moins 2 % du mélange. (Cette dernière recommandation est considérée comme trop « sévère » par l'INERIS).

La densité d'obstacles est ensuite définie à partir des variables :

- *BR* pour « Blockage Ratio », qui représente l'aire occupée par les solides sur l'aire totale offerte aux gaz dans les différentes directions de propagation des flammes,
- *P* pour « pitch » qui correspond à la distance entre 2 rangées successives d'obstacles.

Densité d'obstacles	Types d'obstacles
forte	$BR \geq 40\%$ et il existe au moins 3 rangées d'obstacles
moyenne	Tous les autres cas
faible	$BR \leq 10\%$ et le lieu d'explosion ne comporte qu'une à deux rangées d'obstacles

Le degré de confinement peut-être :

- Axial (1D) lorsque l'explosion se déroule dans un volume caractérisé par un ratio longueur sur diamètre important,
- Radial (2D) lorsque le front de flamme se propage entre deux plans formés par exemple par le sol et un plafond,
- Sphérique (3D) peut être observé dès lors qu'aucune paroi n'est en mesure de canaliser la propagation des flammes.

Puis, pour un cas donné, lorsque les classes de réactivité, de densité d'obstacles et le degré de confinement sont déterminés, la vitesse de flamme ou la surpression maximale sont obtenues en se référant au tableau reporté ci-après.

Degrés de confinement 1D, soit un mode de propagation axial des flammes							
		Densité d'obstacles					
		forte		moyenne		faible	
		(Mach ²⁹)	(kPa)	(Mach)	(kPa)	(Mach)	(kPa)
réactivité	forte	5,2	>1000	5,2	>1000	5,2	>1000
	moyenne	2,265	800	1,765	400	1,029	200
	faible	2,265	800	1,029	200	0,294	40
Degrés de confinement 2D, soit un mode de propagation radial des flammes							
		Densité d'obstacles					
		forte		moyenne		faible	
		(Mach)	(kPa)	(Mach)	(kPa)	(Mach)	(kPa)
réactivité	forte	1,765	400	1,029	200	0,588	100
	moyenne	1,235	300	0,662	120	0,118	7
	faible	0,662	120	0,471	70	0,079	4
Degrés de confinement 3D, soit un mode de propagation sphérique des flammes							
		Densité d'obstacles					
		forte		moyenne		faible	
		(Mach)	(kPa)	(Mach)	(kPa)	(Mach)	(kPa)
réactivité	forte	0,588	100	0,153	15	0,071	4
	moyenne	0,206	20	0,1	7	0,037	1
	faible	0,147	15	0,1	7	0,037	1

Tableau 5 : correspondance entre les conditions d'explosion et les vitesses de flamme (exprimées en Nombre de Mach) ou surpressions aériennes

$$\text{Mach} = V_f / C$$

V_f : vitesse de flamme

C : célérité de la lumière

Cette méthode permet de dégager des « indications » quant aux surpressions maximum possibles. Qualitativement, ces indications paraissent conformes à l'état des connaissances sur le déroulement des explosions. Quantitativement, les résultats obtenus doivent être utilisés, pour le moins, avec prudence.

5 LES EFFETS D'UNE EXPLOSION

5.1 Ordres de grandeur pour les structures

Nature de la paroi	Surpression de ruine (statique) Prupture
Tour de manutention en béton	100 à 300 mbar
Tour de manutention en bardage métallique ou en fibrociment	15 à 100 mbar
Tour de manutention en palplanches (tôles résistantes, type profils Omega)	300 à 1000 mbar
Cellules en béton : parois	150 à 1000 mbar
Cellules en béton : toits	100 à 400 mbar
Cellule métalliques : parois	300 à 1000 mbar
Cellules métalliques : toits	100 à 200 mbar
Galeries sur-cellules en béton	100 mbar
Briques	100 à 300 mbar
Tuiles	5 mbar
Verre simple/armé	3 à 25 mbar
Plaque polyester transparente (fixations crochets)	10 mbar
Polycarbonate avec des fixations crochets	10 mbar
Plaque amiante-ciment (fixations crochets)	10 à 100 mbar

Source : Guide silo INERIS Version 3 – 2008

Seuils de surpression relatifs à la résistance des structures	
Dégâts constatés	Surpression (mbar)
Bris de vitres :	
➤ Valeur type de bris de vitres	10
➤ Destruction des vitres $\geq 10\%$, limite de petits dommages	20
➤ Destruction de 50 %des vitres	25
➤ Destruction de 75 % des vitres et occasionnelle des cadres de fenêtre	50
➤ Destruction totale des vitres, détérioration partielle des maisons	70
Dégâts légers aux structures	30
Détérioration et destruction des cadres de fenêtres selon leur nature	100

Source : Guide technique relatif aux valeurs de référence de seuils d'effets des phénomènes accidentels des installations classées – MEDD- Octobre 2004

Seuils de surpression relatifs à la résistance des structures		
<i>Type de dégâts constatés</i>	<i>Surpression (mbar)</i>	<i>% dommage estimés</i>
Seuil des dégâts graves sur les structures		
Effondrement partiel des murs, des toits et tuiles des maisons	140	50%
Limite inférieure des dommages graves aux structures (la plupart des dégâts sont réparables et correspondent à des tuiles projetées, des vitres cassées, des panneaux tordus, fissures dans murs)		
Effondrement partiel de murs de 20 cm d'épaisseur (INRS)		
Vitres de voitures face à l'onde surpression explosées		
Légères fissures dans les murs en brique de 30 cm d'épaisseur		
Toiture en fibrociments détruite		
Charpente bois lamellé collé porteuse en partie détruite		
Déformation de réservoirs de stockage de 150 m3 (avec robe de 3mm d'épaisseur)		
cassures dans les murs légers (plâtre, fibrociment, bois, tôle)		
Revêtement de murs en PVC éclaté		
Joint entre tôles ondulées en acier ou aluminium arrachés		
Fissure dans la robe d'un réservoir métallique		
Seuil des effets dominos		
Rupture des structures métalliques et déplacement des fondations	200	100%
Fissure ou rupture des réservoirs de stockage		
Murs en parpaings ou béton non armé détruit		
Lézardes et cassures dans les murs béton ou parpaings non armés de 20 à 30 cm		
Destruction à 50 % des maisons en briques		
Destruction de 50% des maisons en briques (INRS)		
Maisons inhabitables, effondrement partiel ou totale de la toiture, démolition d'1 ou 2 murs extérieurs, dégâts importants aux murs porteurs intérieurs (INRS)		
Véhicules sur parking : vitres cassées et carrosserie sérieusement endommagée		
Toitures détruites		
Déformations légères des canalisations		
Légers dommages aux machines dans les bâtiments industriels, cadres en acier des bâtiments déformés et/ou arrachés de leurs fondations		
Seuil des dégâts très graves sur les structures		
Destruction des bâtiments légers en charpente métallique, rupture des réservoirs de stockage	300	100%
Destruction des poteaux		
Revêtement des bâtiments industriels légers soufflé		
Maisons d'habitation détruites		
Déplacement d'un rack de canalisations, rupture des canalisations		
Bardage acier des bâtiments arrachés, détruits		
Destruction des bâtiments industriels légers		

Source : Guide du MEDD pour l'estimation des dommages matériels potentiels aux biens des tiers en cas d'accidents majeurs

5.2 Ordre de grandeur pour l'homme

Seuils d'effets de surpression pour l'homme		
<i>Types d'effets constatés</i>	<i>Surpression(mbar)</i>	<i>Référence</i>
Létaux (par effets directs : hémorragies pulmonaires)	1000	TNO, 1989
	700 (correspondant potentiellement à 99% de plétalité) 200 (correspondant potentiellement à 1% de létalité)	TM5-1300 US Department of the Army, 1990 Centre de recherché du service de santé des armies, 1982
Létaux (par effets indirects)	140	Baker, 1983 ; Lees, 1996 ; Guide MU 90
Irréversibles	50	Lees, 1996 ; Guide MU 90
	20 (effets indirects par bris de vitres)	
Détérioration des tympans	340	INERIS
	300 (correspondant potentiellement à 1% de plétalité)	TNO, 1989

Source : Guide technique relatif aux valeurs de référence de seuils d'effets des phénomènes accidentels des installations classées – MEDD- Octobre 2004

5.3 Les seuils réglementaires – arrêté du 29/09/2005

Les valeurs de référence pour les installations classées sont fixées par l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation

5.3.1 Effets sur l'homme

	Seuils des effets de surpression
Seuil des effets Indirects par bris de vitres	20 mbar
SEI <i>ou dangers significatifs</i>	50 mbar
SEL <i>Ou dangers graves, premiers effets létaux</i>	140 mbar
SELS <i>Ou dangers très graves, effets létaux significatifs</i>	200 mbar

5.3.2 Effets sur les structures

	Seuils des effets de surpression
Seuil des destructions de vitres significatives <i>(plus de 10% des vitres)</i>	20 mbar
Seuil des dégâts légers	50 mbar
Seuil des dégâts graves	140 mbar
Seuil des effets dominos	200 mbar
Seuil des dégâts très graves	300 mbar